

# Contenido

## PREFACIO xv

## Capítulo 1 FUNDAMENTOS ELECTROMECHANICOS 1

- 1-1 Sistema típico de potencia de CA, 1
- 1-2 Fundamentos de electromagnetismo, 3
- 1-3 Ley de Faraday de la inducción electromagnética, 5
- 1-4 Factores que afectan a la magnitud de la FEM inducida, 6
- 1-5 Dirección de la FEM inducida, regla de Fleming, 10
- 1-6 Ley de Lenz, 10
- 1-7 Generadores elementales, 12
- 1-8 Demostración de la regla de Fleming de la mano derecha mediante la ley de Lenz, 13
- 1-9 Polaridad de un generador elemental, 14
- 1-10 FEM generada por el giro de una espira en un campo magnético uniforme a velocidad constante, 14
- 1-11 Rectificación mediante un conmutador de anillo bipartido, 16
- 1-12 Devanado de anillo de Gramme, 18
- 1-13 Valores nominales de voltaje, corriente y potencia de una dínamo, 22
- 1-14 FEM promedio generada en un cuarto de revolución, 24
- 1-15 Ecuación fundamental del generador de CD para la FEM promedio entre escobillas, 26
- 1-16 Fuerza electromagnética, 27
- 1-17 Factores que afectan a la magnitud de la fuerza electromagnética, 28
- 1-18 Dirección de la fuerza electromagnética y regla de la mano izquierda, 29
- 1-19 Fuerza contraelectromotriz, 30
- 1-20 Comparación entre la acción de motor y la acción de generador, 31
- 1-21 Glosario de términos empleados, 33
- 1-22 Preguntas, 35
- 1-23 Problemas, 36

## **Capítulo 2 CONSTRUCCION Y DEVANADO DE LA DINAMO 39**

- 2-1 Posibilidades de la dínamo, 39
- 2-2 Construcción de la dínamo de corriente directa (CD), 40
- 2-3 Construcción de la dínamo síncrona (campo estacionario), 42
- 2-4 Construcción de la dínamo síncrona (campo rotatorio), 42
- 2-5 Construcción de la dínamo asíncrona de inducción, 44
- 2-6 Campos y circuitos magnéticos de la dínamo de CD, 44
- 2-7 Reactancia de armadura, 45
- 2-8 Campos y circuitos magnéticos de la dínamo de CA, 46
- 2-9 Cálculos de flujo magnético, 47
- 2-10 Devanados de armadura, 49
- 2-11 Devanados imbricados y ondulados: semejanzas y diferencias, 51
- 2-12 Resumen de devanados, 55
- 2-13 Devanados de armadura de la dínamo síncrona de CA, 57
- 2-14 Devanados de media bobina y de bobina completa, 58
- 2-15 Devanados acortados o de paso fraccionario, 58
- 2-16 Devanados distribuidos y factor de distribución (de arrollamiento), 61
- 2-17 Efecto del paso fraccionario y la distribución de bobina sobre la forma resultante de la onda, 64
- 2-18 FEM generada en una dínamo síncrona de CA, 67
- 2-19 Frecuencia de una dínamo síncrona de CA, 69
- 2-20 Glosario de términos empleados, 69
- 2-21 Preguntas, 72
- 2-22 Problemas, 73

## **Capítulo 3 RELACIONES DE VOLTAJE DE LA DINAMO DE CD: GENERADORES DE CD 75**

- 3-1 Generalidades, 75
- 3-2 Tipos de generadores de CD, 76
- 3-3 Diagrama esquemático y circuito equivalente de un generador en derivación, 76
- 3-4 Diagrama esquemático y circuito equivalente de un generador en serie, 78
- 3-5 Diagrama esquemático y circuito equivalente de un generador serie-paralelo o compuesto, 79
- 3-6 Generador con excitación separada, 80
- 3-7 Características de voltaje sin carga o en vacío de un generador de CD, 81
- 3-8 Líneas de resistencia de campo de un generador en derivación autoexcitado, 84
- 3-9 Crecimiento de voltaje en un generador en derivación autoexcitado, 85
- 3-10 Resistencia crítica del campo, 86
- 3-11 Causas por las cuales no desarrolla voltaje un generador autoexcitado en derivación, 87
- 3-12 Efecto de la carga sobre la desacumulación en un generador autoexcitado en derivación, 88
- 3-13 Características de carga contra voltaje de un generador en derivación, 89
- 3-14 Efecto de la velocidad sobre las características de un generador en derivación con y sin carga, 92

- 3-15 Regulación de voltaje de un generador, 93
- 3-16 Generador en serie, 95
- 3-17 Genreador compuesto, 96
- 3-18 Características de un generador compuesto acumulado, 96
- 3-19 Ajuste del grado de composición de los generadores compuestos acumulados, 99
- 3-20 Generador diferencial compuesto, 100
- 3-21 Comparación sumaria de características de carga-voltaje en generadores en derivación y compuestos, 101
- 3-22 Efecto de la velocidad sobre las características de carga-voltaje de los generadores en derivación y compuestos, 102
- 3-23 Especificaciones de generadores, 103
- 3-24 Regla rápida para la relación entre el tamaño de una dínamo y su velocidad, 103
- 3-25 Glosario de términos empleados, 104
- 3-26 Preguntas, 105
- 3-27 Problemas, 107

## **Capítulo 4 RELACIONES DE PAR EN LA DINAMO DE CD: MOTORES DE CD 109**

- 4-1 Generalidades, 109
- 4-2 Relación entre par y fuerza, 110
- 4-3 Ecuaciones fundamentales de par en una dínamo de CD, 115
- 4-4 Fuerza contraelectromotriz o voltaje generado en un motor, 117
- 4-5 Velocidad del motor como función de la fuerza contraelectromotriz, 118
- 4-6 Fuerza contraelectromotriz y potencia mecánica desarrollada por un motor, 120
- 4-7 Relación entre par y velocidad de un motor, 121
- 4-8 Arrancadores para motores de CD, 124
- 4-9 Características del par electromagnético en motores de CD, 127
- 4-10 Características de velocidad en los motores de CD, 130
- 4-11 Regulación de velocidad, 136
- 4-12 Par externo, potencia y velocidad, 137
- 4-13 Inversión de dirección de giro en un motor de CD, 138
- 4-14 Efecto de la reacción de armadura sobre la regulación de velocidad en todos los motores de CD, 142
- 4-15 Glosario de términos empleados, 142
- 4-16 Preguntas, 143
- 4-17 Problemas, 144

## **Capítulo 5 REACCION DE ARMADURA Y CONMUTACION EN DINAMOS 148**

- 5-1 Generalidades, 148
- 5-2 Campo magnético producido por la corriente de armadura, 148
- 5-3 Efecto del flujo de armadura sobre el flujo de campo, 149
- 5-4 Desplazamiento del plano neutro en el generador comparado con el motor, 152
- 5-5 Compensación para reacción de armadura en las dínamos de CD, 154
- 5-6 La conmutación, 156

- 5-7 Voltaje de reactancia, 160
- 5-8 Reacción de armadura en la dínamo de CA, 162
- 5-9 Resumen de la reacción de armadura en todas las dinamos, 165
- 5-10 Glosario de términos empleados, 166
- 5-11 Preguntas, 167
- 5-12 Problemas, 168

## **Capítulo 6 RELACIONES DE VOLTAJE EN DINAMOS DE CA: ALTERNADORES 170**

- 6-1 Generalidades, 170
- 6-2 Construcción, 172
- 6-3 Ventajas de la construcción con armadura estacionaria y campo giratorio, 172
- 6-4 Primomotores (máquinas de impulsión), 175
- 6-5 Circuito equivalente para la dínamo síncrona monofásica y/o polifásica, 176
- 6-6 Comparaciones entre el generador de CD con excitación separada y el alternador síncrono de CA con excitación separada, 178
- 6-7 Relación entre voltaje generado y voltaje de terminales de un alternador para varios factores de potencia de carga, 178
- 6-8 Regulación de voltaje de un alternador síncrono de CA con varios factores de potencia, 181
- 6-9 Impedancia síncrona, 184
- 6-10 Método de la impedancia síncrona (o FEM) para predicción de la regulación de voltaje, 185
- 6-11 Hipótesis inherentes al método de la impedancia síncrona, 190
- 6-12 Corrientes de cortocircuito y empleo de reactores limitadores de corriente, 193
- 6-13 Relaciones de potencia y par, 194
- 6-14 Glosario de términos empleados, 196
- 6-15 Preguntas, 197
- 6-16 Problemas, 198

## **Capítulo 7 FUNCIONAMIENTO EN PARALELO 201**

- 7-1 Ventajas del funcionamiento en paralelo, 201
- 7-2 Relaciones de voltaje y corriente para fuentes de FEM en paralelo, 202
- 7-3 Funcionamiento en paralelo de generadores derivación, 206
- 7-4 Condiciones necesarias para el funcionamiento en paralelo de los generadores derivación, 208
- 7-5 Funcionamiento en paralelo de generadores compuestos, 208
- 7-6 Condiciones necesarias para el funcionamiento en paralelo de generadores compuestos, 209
- 7-7 Procedimiento para conectar en paralelo los generadores de CD, 210
- 7-8 Condiciones necesarias para conectar los alternadores en paralelo, 212
- 7-9 Sincronización de alternadores monofásicos, 213
- 7-10 Efectos de la corriente de sincronización (circulación) entre alternadores monofásicos, 216
- 7-11 Efecto estabilizador de la corriente de sincronización, 223
- 7-12 Fluctuación u oscilación de alternadores, 226
- 7-13 Sincronización de alternadores polifásicos, 227
- 7-14 Sincronoscopios, 229

- 7-15 Indicador de secuencia de fases, 231
- 7-16 Resumen del procedimiento correcto para conectar en paralelo alternadores polifásicos, 234
- 7-17 Control de frecuencia del voltaje de barras en una estación generadora, 235
- 7-18 Glosario de términos empleados, 236
- 7-19 Preguntas, 237
- 7-20 Problemas, 238

## **Capítulo 8 RELACIONES DE PAR EN LA DINAMO DE CA: MOTORES SINCRONOS 241**

- 8-1 Generalidades, 241
- 8-2 Construcción del motor síncrono, 242
- 8-3 Funcionamiento del motor síncrono, 243
- 8-4 Arranque de motores síncronos, 245
- 8-5 Arranque de un motor síncrono como motor de inducción mediante sus devanados amortiguadores, 246
- 8-6 Arranque de un motor síncrono con carga, 248
- 8-7 Funcionamiento del motor síncrono después del periodo de arranque, 249
- 8-8 Efecto del aumento de carga a excitación normal en un motor síncrono, 253
- 8-9 Efecto de aumento de carga en condiciones de subexcitación, 255
- 8-10 Efecto de aumento de carga en condiciones de sobreexcitación, 256
- 8-11 Resumen del efecto del aumento de carga (sin tomar en cuenta los efectos de la reacción de armadura) en condiciones de excitación constante, 257
- 8-12 Efectos de la reacción de armadura, 257
- 8-13 Ajuste del factor de potencia de un motor síncrono con carga constante, 259
- 8-14 Curvas V para un motor síncrono, 263
- 8-15 Cálculo del ángulo del par y del voltaje generado por fase para un motor síncrono polifásico, 267
- 8-16 Propiedad única del motor síncrono como dispositivo de corrección del factor de potencia, 272
- 8-17 Potencia y par electromagnéticos desarrollados por fase en un motor síncrono, 274
- 8-18 Capacidades de motores síncronos contra especificaciones de factor de potencia, 279
- 8-19 Capacitores síncronos, 280
- 8-20 Ventajas y límites económicos de la corrección del factor de potencia, 282
- 8-21 Resolución de problemas de corrección de factor de potencia empleando el triángulo de potencia compleja y la cuadrícula de potencia, 285
- 8-22 Empleo de un capacitor síncrono como reactor síncrono, 290
- 8-23 Empleo de un motor síncrono como cambiador de frecuencia, 291
- 8-24 Motor supersíncrono, 293
- 8-25 Motores especiales síncronos que no emplean excitación de campo con CD, 294
- 8-26 Motor síncrono de inducción, 295

- 8-27 Motor de reluctancia, 297
- 8-28 Motor de histéresis, 298
- 8-29 Motores subsíncronos, 299
- 8-30 Fuentes de estado sólido para la CD del campo, 300
- 8-31 Motor síncrono sin escobillas, 300
- 8-32 Glosario de términos empleados, 302
- 8-33 Preguntas, 304
- 8-34 Problemas, 305

## **Capítulo 9 DINAMOS POLIFASICAS DE INDUCCION (ASINCRONAS) 308**

- 9-1 Generalidades, 308
- 9-2 Construcción, 309
- 9-3 Producción de un campo magnético rotatorio por aplicación de CA polifásica a la armadura del estator, 310
- 9-4 Principio del motor de inducción, 313
- 9-5 Conductores del rotor, FEM inducida y par del rotor en reposo, 315
- 9-6 Par máximo del motor de inducción, 321
- 9-7 Características de funcionamiento del motor de inducción, 322
- 9-8 Características de funcionamiento normal del motor de inducción en marcha, 324
- 9-9 Efecto de un cambio en la resistencia del rotor, 326
- 9-10 Características de arranque de un motor de rotor devanado cuando se agrega resistencia al rotor, 327
- 9-11 Características de funcionamiento de un motor de inducción de rotor devanado agregando resistencia al rotor, 332
- 9-12 Par del motor de inducción y potencia desarrollada por el rotor, 332
- 9-13 Medición del deslizamiento de acuerdo con varios métodos, 345
- 9-14 Arranque del motor de inducción, 347
- 9-15 Arranque a voltaje reducido con autotransformador, 349
- 9-16 Arranque a voltaje reducido con resistor o reactor primarios, 351
- 9-17 Arranque en estrella-delta, 352
- 9-18 Arranque con parte del devanado, 352
- 9-19 Arranque del motor de inducción de rotor devanado, 353
- 9-20 Motor de inducción de doble jaula de ardilla para arranque en línea, 354
- 9-21 Clasificación de los motores comerciales de inducción por sus propiedades eléctricas y mecánicas, 355
- 9-22 Generador de inducción, 364
- 9-23 Convertidor de frecuencia de inducción, 366
- 9-24 Glosario de términos empleados, 367
- 9-25 Preguntas, 369
- 9-26 Problemas, 371

## **Capítulo 10 MOTORES MONOFASICOS 374**

- 10-1 Generalidades, 374
- 10-2 Construcción del motor monofásico de inducción, 375
- 10-3 Par balanceado de un motor monofásico de inducción en reposo, 376
- 10-4 Par resultante de un motor monofásico de inducción como producto del giro del rotor, 378

- 10-5 Motor de inducción de fase partida y arranque por resistencia, 381
- 10-6 Motor de inducción de fase partida y arranque por capacitor, 385
- 10-7 Motor de capacitor de un valor y fase partida permanente, 388
- 10-8 Motor con capacitor de dos valores, 391
- 10-9 Motor de inducción de polo sombreado, 393
- 10-10 Motor de inducción de arranque por reluctancia, 397
- 10-11 Motores monofásicos con conmutador, 398
- 10-12 Motor universal, 398
- 10-13 Motor serie de CA, 400
- 10-14 Comparación de diversos tipos de motores monofásicos, 402
- 10-15 Glosario de términos empleados, 406
- 10-16 Preguntas, 407
- 10-17 Problemas, 409

## **Capítulo 11 DINAMOS ESPECIALIZADAS 412**

- 11-1 Generalidades, 412
- 11-2 Dínamo homopolar (acíclica), 412
- 11-3 Servomotores de CD, 414
- 11-4 Motor de CD sin escobillas, 420
- 11-5 Motores de pasos de CD, 423
- 11-6 Servomotores de CA, 429
- 11-7 Generadores tacométricos de CA, 431
- 11-8 Motores lineales de inducción (LIMs), 433
- 11-9 Otros motores lineales de propulsión, 436
- 11-10 Dispositivos de levitación magnética, 440
- 11-11 Vehículos de levitación magnética (MAGLEV), 443
- 11-12 Máquinas síncronas asincronizadas, 447
- 11-13 Glosario de términos empleados, 448
- 11-14 Preguntas, 449
- 11-15 Problemas, 451

## **Capítulo 12 RELACIONES DE POTENCIA, ENERGIA Y EFICIENCIA PARA DINAMOS DE CD Y CA 453**

- 12-1 Generalidades, 453
- 12-2 Pérdidas de potencia en la dínamo, 455
- 12-3 Diagramas de flujo de potencia, 459
- 12-4 Cálculo de las pérdidas, 460
- 12-5 Eficiencia de la dínamo de CD, 460
- 12-6 Eficiencia máxima, 467
- 12-7 Separación de las pérdidas de potencia en dínamos de CD, 470
- 12-8 Separación de las pérdidas de potencia en dínamos síncronas de CA, 475
- 12-9 Prueba convencional en vacío o con carga ligera para una dínamo síncrona de CA, 478
- 12-10 Ventilación de los alternadores, 480
- 12-11 Eficiencia (y regulación) de la dínamo síncrona de CA mediante el método del motor de CD calibrado, 481
- 12-12 Eficiencia de la dínamo asíncrona, 485
- 12-13 Eficiencia del motor de inducción mediante pruebas con carga ligera (sin carga) y de rotor bloqueado, 487

- 12-14 Eficiencia del motor de inducción a partir del método del circuito equivalente de carga-deslizamiento, 490
- 12-15 Eficiencia del motor de inducción empleando las constantes de máquina, 494
- 12-16 Corriente de arranque del motor de inducción, a partir de las letras de código para rotor bloqueado, 497
- 12-17 Eficiencia de los motores monofásicos de CA, 499
- 12-18 Glosario de los términos empleados, 504
- 12-19 Preguntas, 505
- 12-20 Problemas, 507

## **Capítulo 13 CAPACIDADES, SELECCION Y MANTENIMIENTO DE LAS MAQUINAS ELECTRICAS 513**

- 13-1 Factores que afectan a la capacidad de las máquinas, 514
- 13-2 Información de placa, 514
- 13-3 Elevación de temperatura y norma de temperatura ambiente, 515
- 13-4 Tamaño de armazón en función de velocidad y potencia, 520
- 13-5 Voltajes nominales, 524
- 13-6 Efecto del ciclo de trabajo y la temperatura ambiente sobre el tamaño del armazón y la capacidad, 525
- 13-7 Tipos de envoltentes (carcasas), 527
- 13-8 Velocidad nominal: clasificaciones de velocidad y reversibilidad, 528
- 13-9 Otros factores que afectan a la selección de la dínamo de CD o CA, 531
- 13-10 El sistema por unidad, 533
- 13-11 Mantenimiento preventivo y localización de fallas, 538
- 13-12 Glosario de términos empleados, 539
- 13-13 Preguntas, 541
- 13-14 Problemas, 542

## **Capítulo 14 TRANSFORMADORES 545**

- 14-1 Definiciones fundamentales, 545
- 14-2 El transformador ideal, 548
- 14-3 Transferencia máxima de potencia mediante un transformador de igualación entre fuente y carga, 556
- 14-4 Aplicaciones como transformadores de aislamiento, 559
- 14-5 Transformadores prácticos de núcleo de hierro, 563
- 14-6 Regulación de voltaje de un transformador práctico: la prueba de cortocircuito, 572
- 14-7 Eficiencia del transformador, 579
- 14-8 Respuesta a la frecuencia del transformador de núcleo de hierro, 584
- 14-9 Cálculos de transformadores empleando el sistema por unidad, 586
- 14-10 Autotransformadores, 598
- 14-11 Eficiencia en el día, 604
- 14-12 Faseo, identificación y polaridad de los devanados de los transformadores, 606
- 14-13 Conexión en serie y en paralelo de devanados del transformador, 609

- 14-14 Transformación trifásica, 613
- 14-15 Armónicas en los transformadores, 620
- 14-16 Importancia del neutro del transformador en transformaciones trifásicas, 623
- 14-17 Relaciones de transformación V-V: sistema de delta abierta, 627
- 14-18 Relaciones para transformación T-T, 629
- 14-19 Conexión de Scott: transformaciones de 3 a 2 fases, o de 2 a 3 fases, 632
- 14-20 Transformaciones trifásicas a seis fases, 635
- 14-21 Empleo de transformaciones polifásicas en conversión de potencia (CA a CD), 643
- 14-22 Glosario de términos empleados, 650
- 14-23 Preguntas, 652
- 14-24 Problemas, 656

## **APENDICE 663**

- A-1 Unidades SI, definiciones y factores de conversión, 663
- A-2 Deducción de las relaciones entre par, potencia y velocidad, 669
- A-3 Secciones aplicables del Código Nacional Eléctrico de EUA (NEC), 670
- A-4 Deducción y demostración de que los flujos de reacción en la armadura producen una magnitud resultante constante que tiene una relación geométrica constante con el flujo de campo independientemente del tiempo o del factor de potencia de una armadura trifásica, 677
- A-5 Deducción de relaciones de potencia y par de un alternador síncrono, 678
- A-6 Deducción del voltaje generado por fase y el ángulo del par de los motores síncronos polifásicos y monofásicos, 680
- A-7 Deducción de ecuaciones de potencia y par en un motor síncrono, 681
- A-8 Deducción de la eficiencia máxima de la dinamo de CD, 686
- A-9 Deducción de los valores por unidad para transformadores, 687

## **RESPUESTAS A LOS PROBLEMAS DE ESTE LIBRO 693**